

УДК 621.391

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ РЕКУРСИВНЫХ ФИЛЬТРОВ В АНТЕННОМ ПОДАВИТЕЛЕ ПОМЕХ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

И.М. СОКОЛОВ

Статья представлена доктором технических наук, профессором Рубцовым В.Д.

В статье рассматривается целесообразность применения адаптивных рекурсивных фильтров в антенном подавителе помех глобальных навигационных спутниковых систем. Эффективность применения подобных фильтров оценивается при помощи постобработки с использованием выборки отсчетов аналого-цифрового преобразователя реального устройства.

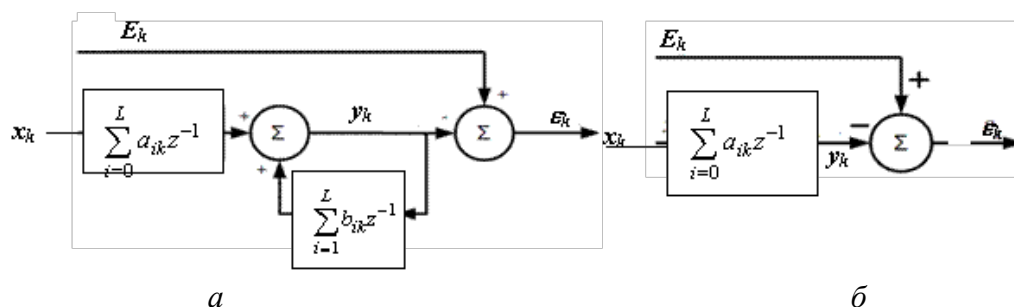
**Ключевые слова:** адаптивный рекурсивный фильтр, антенный подавитель помех.

В связи с низкой помехоустойчивостью глобальных навигационных спутниковых систем, таких как ГЛОНАСС или GPS, их применение в условиях действия маскирующих помех практически невозможно. Достаточно одного мощного постановщика помех (ПП), чтобы полностью вывести из строя навигационную аппаратуру потребителей (НАП).

Наиболее эффективным способом борьбы с ПП является использование антенного подавителя помех (АПП). Он представляет из себя антенную решетку из  $N_a$  антенных элементов. Принцип работы заключается в том, что по разности фаз сигналов, пришедших на элементы решетки, вычисляются весовые коэффициенты  $w$  так, чтобы компенсировать сигнал помехи. В матричной форме алгоритм можно записать  $\varepsilon = E - W^T X$ , где  $E$  - вектор-строка отсчетов сигнала главного элемента;  $X$  - матрица, состоящая из вектор-строк отсчетов сигналов периферийных элементов;  $W$  - вектор-столбец весовых коэффициентов;  $\varepsilon$  - выходной сигнал.

В случае узкополосных систем оптимальный весовой вектор  $w$  определяется уравнением Винера-Хопфа в матричной форме  $W^* = R^{-1}P$ .

Здесь  $R$  - корреляционная матрица сигналов периферийных элементов, а  $P$  - вектор, состоящий из множества значений взаимно корреляционной функции отсчетов главного элемента и отсчетов периферийных элементов. Так как ГНСС являются широкополосными системами, то для достижения винеровского решения необходимо использовать адаптивные нерекурсивные или рекурсивные цифровые фильтры. На рис. 1 представлены схемы реализации этих фильтров в АПП.



**Рис. 1.** Схемы реализации адаптивных фильтров: а - рекурсивный; б - нерекурсивный

В табл. 1 представлены итеративные алгоритмы для расчета весовых коэффициентов [2].

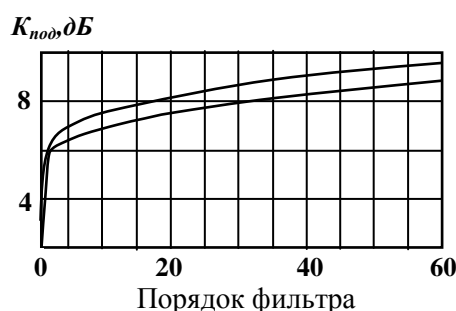
Таблица 1

## Адаптивные алгоритмы для расчета весовых коэффициентов

Алгоритм наименьших квадратов для формирования весовых коэффициентов нерекурсивного фильтра	Алгоритм наименьших квадратов для формирования весовых коэффициентов рекурсивного фильтра
$W_k = [a_{0k} a_{1k} \dots a_{Lk}]^T;$ $\hat{V}_k = -2(E_k - y_k)[x_{0k} \dots x_{Lk}]^T;$ $W_{k+1} = W_k - \mu_k \nabla$	$W_k = [a_{0k} a_{1k} \dots a_{Lk} b_{1k} b_{2k} \dots b_{Lk}]^T; U_k = [x_k x_{k-1} \dots x_{k-L} y_{k-1} \dots y_{k-L}]^T;$ $\alpha_{nk} = x_{n-k} + \sum_{l=1}^L b_{lk} \alpha_{n,k-1}, 0 \leq n \leq L; \beta_{nk} = y_{n-k} + \sum_{l=1}^L a_{lk} \beta_{n,k-1}, 1 \leq n \leq L;$ $b_{nk} = -2(E_k - y_k)[a_{0k} \dots a_{Lk} \beta_{1k} \dots \beta_{Lk}]^T; \nabla W_{k+1} = W_k - M_k \nabla$

Здесь индекс  $k$  - номер итерации; индекс  $l$  - номер ответвления адаптивного фильтра.

В [2] утверждается, что для достижения требуемой импульсной характеристики рекурсивному фильтру требуется меньше ответвлений, чем нерекурсивному. Можно ожидать, что применение фильтров первого типа при том же количестве ответвлений позволит приблизиться к винеровскому решению. Нет сведений об использовании адаптивных рекурсивных фильтров для решения задачи подавления помех ГНСС. Однако есть возможность оценить эффективность данного метода путем постобработки, которая заключается в том, чтобы накопить отсчеты аналого-цифрового преобразователя реального устройства в реальной помеховой обстановке и обработать их на ЭВМ. Результаты данного подхода представлены на рис. 2.



**Рис. 2.** График зависимости улучшения коэффициента подавления  $\delta K_{под}$  от порядка фильтров

Здесь по оси абсцисс отложен порядок используемого фильтра, а по оси ординат - увеличение коэффициента подавления  $\delta K_{под}$  относительно коэффициента подавления алгоритма наименьших квадратов без использования адаптивных фильтров. Из рисунка видно, что при использовании фильтров первого порядка наблюдается значительный выигрыш рекурсивного фильтра (пунктирная линия). Однако далее эта разница становится несущественной и составляет  $\sim 0,1$  дБ уже при применении фильтров второго порядка. При шестидесятом порядке разница возрастает до  $\sim 0,5$  дБ.

Таким образом, применение в антенном подавителе помех нерекурсивных фильтров не уступает по эффективности применению рекурсивных фильтров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Уидрой Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов / пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1989.
2. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / пер. с англ. - 2-е изд. - М.: Бином-Пресс, 2006.

## **USAGE OF ADAPTIVE RECURSIVE FILTERS IN THE ANTENNA INTERFERENCE SUPPRESSOR OF GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS**

**Sokolov I.M.**

The article discusses the applicability of adaptive recursive filters in antenna interference suppressor of global navigation satellite systems. The effectiveness of such filters is evaluated by postprocessing using sampling of the analog-to-digital converter of a real device.

**Keywords:** adaptive recursive filter, antenna interference suppressor.

### **Сведения об авторе**

**Соколов Иван Михайлович**, 1987 г.р., окончил МИФИ (ГУ) (2010), аспирант МГТУ ГА, автор 5 научных работ, область научных интересов - спутниковая навигация.